

## 染料激光器 (下)

内蒙古大学物理系激光组

### 四、波长调谐

毛主席教导我们说：“认识的能动作用，不但表现于从感性的认识到理性的认识之能动的飞跃，更重要的还须表现于从理性的认识到革命的实践这一个飞跃。”现在我们讨论染料激光器所发出的激光波长和哪些因素有关，如何实现波长的调谐。

激光器开始振荡的条件是在谐振腔内活性介质中由于受激辐射得到的增益等于或超过功率的损耗。也就是说染料激光器开始振荡时要求净增益等于或大于1。为了使讨论简单起见，我们就忽略三重态的情形来导出起振条件：

$$\exp[\sigma_f(\tilde{\nu})n_1L]R\exp[-\sigma_a(\tilde{\nu})n_0L] \geq 1 \quad (10)$$

其中  $\sigma_a(\tilde{\nu})$  和  $\sigma_f(\tilde{\nu})$  分别是对波数为  $\tilde{\nu}$  的辐射的吸收截面和受激荧光截面。 $R$  是谐振腔宽带反射镜的反射系数。式中第1个因子表示辐射经过路程  $L$  后由于受激辐射的放大，第2个因子表示在谐振腔的反射镜上辐射被反射回来部分的因子，第3个因子表示由于吸收带长波尾引起的荧光再吸收所产生的损耗，至于其他诸如散射、衍射等其他形式的损耗可以用有效反射系数的形式包括进去。

为便于讨论各种不同参数对振荡波长的影响，现将振荡条件(10)式取对数后改写为下列形式

$$\frac{S/n + \sigma_a(\tilde{\nu})}{\sigma_f(\tilde{\nu}) + \sigma_a(\tilde{\nu})} \leq \gamma(\tilde{\nu}) \quad (11)$$

其中  $S = \frac{1}{L} \ln\left(\frac{1}{R}\right)$ ,  $\gamma(\tilde{\nu}) = \frac{n_1}{n}$ ,  $n = n_0 + n_1$ 。式中常数  $S$  只包括谐振腔参数：活性长度  $L$  和反射系数  $R$ 。其他诸如散射、衍射等的损耗可以用有效反射系数的形式包括进去。 $\gamma(\tilde{\nu})$  是到达振荡阈值时所需分子激发到第一激发态的最小因子。由(11)式可以对任何染料浓度  $n$  以及谐振腔  $S$  值，由吸收谱和荧光谱计算函数  $\gamma(\tilde{\nu})$ ，将(11)式对波数  $\tilde{\nu}$  求微商，并令  $d\gamma(\tilde{\nu})/d\tilde{\nu} = 0$ ,

$$\frac{\sigma'_a(\tilde{\nu})\sigma_f(\tilde{\nu}) - \sigma_a(\tilde{\nu})\sigma'_f(\tilde{\nu})}{\sigma_f(\tilde{\nu}) + \sigma_a(\tilde{\nu})} = \frac{S}{n} \quad (12)$$

由此可以得到使  $\gamma$  最小的频率值。这个频率就是激光器的起振频率(式中“'”代表对波数  $\tilde{\nu}$  的微商)。

图9示出激光波长  $\lambda(\gamma(\tilde{\nu}))$  为极小时的波长)随染料浓度变化的关系，其中以  $S$  为参数。图10示出激光波长随谐振腔活性长度  $L$  的变化，其中以染料浓度为参数。

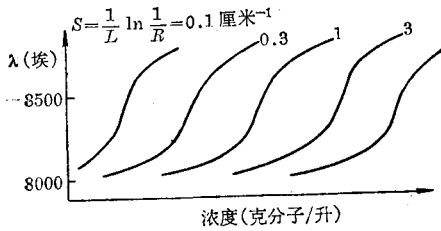


图9 激光波长随染料浓度的变化,  $S$  作为参数

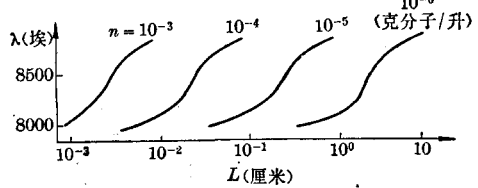


图10 激光波长随谐振腔活性长度的变化。溶液浓度为参数

由上面两个图可以看到改变染料溶液的浓度、活性长度都可以广泛地改变染料激光器的波长。从图9中参数  $S$  所包括的有效反射系数可以看到, 改变谐振腔的衍射、散射等条件也可以改变激光的波长, 这就是下面将讨论的几种精密调谐染料激光器波长所用各种方法的依据。

在这里我们还要进一步指出, 染料激光器的波长与温度有关, 随温度降低而变短, 这是因为当温度降低时, 吸收带和荧光带都变窄, 它们的交迭部分变小, 由此在接近荧光峰的短波侧重吸收损耗变小, 相对地增加了增益, 因此激光波长向短波移动。所以在使用染料激光器时, 为了要得到稳定的波长, 必须保证活性媒质保持恒温, 尤其是稳频染料激光器, 它对温度恒定的要求很严。

染料激光器的波长也随溶剂的性质而异, 由于染料在不同的溶剂中, 染料分子和溶剂分子之间的电偶极矩作用随溶剂之不同而不同。电偶极矩间的作用使分子的能量降低, 其能量差对激发态和基态有所不同, 前者较大, 并且随溶剂的性质而异, 因此对于同一染料在不同溶剂的溶液中, 其激射的波长是随溶剂而改变的。

染料激光器的波长还和溶剂的酸度有关。由于溶剂的酸度不同时, 分子处于不同的电离态, 而通常处于不同电离态的分子发射不同波长的荧光。由此可见, 染料激射的波长随溶剂的 pH 值改变而改变。

如上所述, 粗略地选择染料激光器的波长时可通过选择不同的染料、溶剂和溶液浓度等来实现, 当需要精确地调谐染料激光器的波长时, 尚需采用具有波长选择性能的谐振腔。

至今已有下列四类波长选择谐振腔: (1) 包含空间波长分离装置的谐振腔, (2) 包含干涉波长分离装置的谐振腔, (3) 包含转动色散装置的谐振腔, (4) 具有波长选择分布反馈的谐振腔。

现在分别介绍各种不同类型的波长选择谐振腔。

(1) 第一种类型的波长选择谐振腔中包含利用色散现象在空间把不同波长的辐射分离开来的装置, 使谐振腔对于某一所需波长的增益最大, 优先起振, 从而起到了调谐的作用。通常采用衍射光栅或棱镜作为色散装置。下面分别介绍这两种装置。如图11所示, 将宽带介质镜用李脱洛装置(李脱洛装置是一种装架大的平面反射光栅的一种通用方法)中的平面光栅所代替。这样, 激光器输出的波长可以通过转动光栅而进行精细的调谐。图中示出激光输出随波长的变化, 该装置

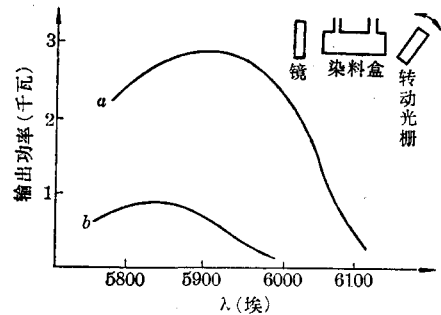


图11 用光栅调谐染料激光器的波长时输出功率随波长的变化  
曲线  $a$ ——级, 曲线  $b$ ——二级, 若丹明 6G 水醇溶液,  $10^{-4}$  的克分子

中装有若丹明 6G 溶液, 光栅为 610 条/毫米, 根据光栅方程

$$d(\sin \alpha + \sin \beta) = m\lambda \quad (13)$$

其中  $m$  为衍射级, 当通过自动瞄准而使入射角  $\beta$  等于衍射角  $\alpha$  时上式变为  $2d \sin \alpha = \lambda$ , 由此可得到角色散为

$$\frac{d\alpha}{d\lambda} = \frac{m}{2d \cos \alpha} \quad (14)$$

如果染料激光的束散角为  $\Delta\alpha$ , 那末这种装置的被动谱宽等于

$$\Delta\lambda_{\alpha} = \frac{2d \cos \alpha}{m} \Delta\alpha \quad (15)$$

如果激光束具有衍射极限束散角  $\Delta\alpha = 1.22\lambda/D$ , 此处  $D$  是激光器谐振腔的内径, 那末被动谱宽

$$\Delta\lambda_D = \frac{2.44\lambda d \cos \alpha}{mD} \quad (16)$$

对于典型的情形,  $\Delta\alpha = 5$  毫弧度,  $D = 2.5$  毫米,  $d = \frac{1}{1200}$  毫米,  $m = 1$ ,  $\lambda = 6000$  埃时,  $\Delta\lambda_{\alpha} =$

78 埃, 而  $\Delta\lambda_D = 3.7$  埃。

如果再采用扩束望远镜, 一方面将光束的束散角减小, 从而减小谱宽, 另一方面可避免大功率激光对反射金属光栅的损坏。

另一种方法是用一个或多个棱镜进行调谐并聚焦谱带。一个棱镜的角色散较小, 用于分离气体激光的一些锐线是足以胜任的, 但难于用来分离闪光灯泵浦染料激光器的光谱。所以要采用多棱镜装置。

按图 12 所示,  $\alpha = 2i - \beta$ ,  $\gamma = \frac{1}{2}\beta$ , 所以

$$\frac{d\mu}{d\alpha} = \frac{\cos \frac{1}{2}(\alpha + \beta)}{2 \sin \frac{1}{2}\beta} \quad (17)$$

当以布儒斯特角  $\text{tg } \alpha = n$  入射时,  $d\alpha/d\mu = 2$ , 棱镜的角色散

$$\frac{d\alpha}{d\lambda} = 2 \frac{d\mu}{d\lambda} \quad (18)$$

用  $N$  个棱镜, 并使自动对准, 那末被动谱宽

$$\Delta\lambda_{\alpha} = \frac{\Delta\alpha}{4N d\mu/d\lambda} \quad (19)$$

其中  $\Delta\alpha$  为染料激光的束散角, 在衍射极限情形,  $\Delta\alpha = 1.22\lambda/D$

$$\Delta\lambda_{\alpha} = \frac{1.22\lambda/D}{4N d\mu/d\lambda} \quad (20)$$

事实上, 多个棱镜装置较转动光栅为好, 能得到较小的被动谱宽, 由于棱镜对光的折射而使光束偏折的特点, 可以用于环形激光器。

(2) 第二种类型的波长选择谐振腔中包含利用干涉现象把所需的波长分离出来的装置。通常是把一个或几个法布里—珀罗标准具或干涉滤光片插入谐振腔内获得窄带宽的激光,

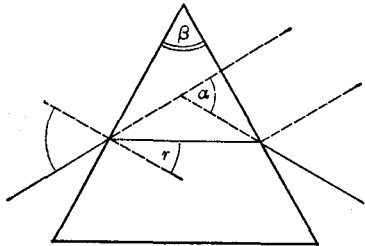


图 12 棱镜

其所以能够使带宽变得特别窄的原因是由于在法布里—珀罗标准具中包含两块平行平板，两板相对的内表面上都薄薄地镀上一层银，利用光在两块板间隙中多次反射而产生的多光束干涉现象使谱线变得特别窄。

对于厚度为  $d$ ，折射系数为  $\mu$  的平行平面玻璃板，与激光器光轴的夹角为  $\alpha$  时，第  $k$  级透射光线最强的波长  $\lambda$  满足下列关系：

$$\frac{2d}{\mu} \cos \alpha' = k\lambda \quad (21)$$

其中  $\alpha'$  为折射角， $\mu \sin \alpha' = \sin \alpha$ ，对于空气 ( $\mu=1$ ) 的情形，由上式可得

$$\frac{d\lambda}{d\alpha} = \lambda \tan \alpha \quad (22)$$

对于束散角  $\Delta\alpha$  的激光束，谱带宽度为

$$\Delta\lambda_{\alpha} = \lambda \tan \alpha \Delta\alpha$$

为了要得到最小的带宽，考虑可能允许的最小束散，它必须使第一次反射的光线不致偏离谐振腔，因此其束散角  $\alpha$  不能大于  $\frac{1}{2}q$ ，此处  $q$  表示谐振腔直径与法布里—珀罗标准具两板内表面之间的距离之比，那末  $\alpha = \frac{1}{2}q$ ，所以由法布里—珀罗标准具得到的最小带宽为

$$\Delta\lambda_{\text{最小}} = \lambda \tan \frac{1}{2}q \Delta\alpha \quad (23)$$

由物理光学知道，当法布里—珀罗标准具的两板严格平行时，相隔一定谱宽  $\Delta\lambda_F$  的相邻两条纹互相重迭的条件是  $k\Delta\lambda = \lambda$ ， $\Delta\lambda_F$  与波长、干涉条纹数  $k$  有关，

$$\Delta\lambda_F = \frac{\lambda}{k} \quad (24)$$

假设谐振腔预选棱镜对于波长为 6000 埃，束散角  $\Delta\alpha = 5$  毫弧度的激光束产生的谱宽为  $\Delta\lambda_{\alpha} = 30$  埃，而由 (24) 式，当  $\lambda_F = 30$  埃时， $k = 200$ ，对于  $d = 60$  微米， $q = 0.05$  的标准具产生的极限束散带宽为  $\Delta\lambda_{\text{最小}} = 0.75$  埃。

法布里—珀罗标准具之所以能使谱宽变窄是由于两平面板的内表面镀了银，增加了反射系数，使之产生多光束干涉。干涉的结果，光能重新分布，反射系数  $R$  越大，反射产生的光束越多，干涉产生的谱线越细，所产生的谱宽为：

$$\delta\lambda = \frac{\Delta\lambda_F}{F} \quad (25)$$

其中  $F = \frac{\pi\sqrt{R}}{1-R}$  称为精细因子，反射系数愈大，产生的相干光越多，但是必须使光束以较小的入射角  $\alpha$  投射到标准具才能产生细条纹，否则它们经多次反射后将越出标准具。但是入射角限制太小了，反过来又限制了波长可调的范围。

由 (21) 式，对于可调法布里—珀罗标准具，垂直入射时 ( $\alpha=0$ ) 的波长为  $\lambda_0$ ，入射角为  $\alpha$  时波长为  $\lambda$ ，调谐过程中波长的移动为

$$\Delta\lambda_s = \lambda - \lambda_0 = (1 - \cos \alpha)\lambda_0 \quad (26)$$

也就是说波长的调谐范围  $\Delta\lambda_s$  与  $\alpha$  有关，随着  $\alpha$  的增大而增大，但是带宽却也随之增大，这就意味着，带宽是随着调谐范围增大而变宽的，因此，要增大调谐范围只能相对增大带宽。另外，当增大调谐范围时，必须以大角度入射到法布里—珀罗标准具，这就会引起严重的逸散损耗。相反，要获得相当窄的带宽，必须减小调谐范围，或者减小激光的束散角。比如，只有转动光栅

的染料激光器的谐振腔中插入法布里—珀罗标准具,其带宽从原来的 0.03 埃减小为 0.004 埃 (同时其输出功率减小), 当用二个标准具时所得到的带宽为 0.001 埃。

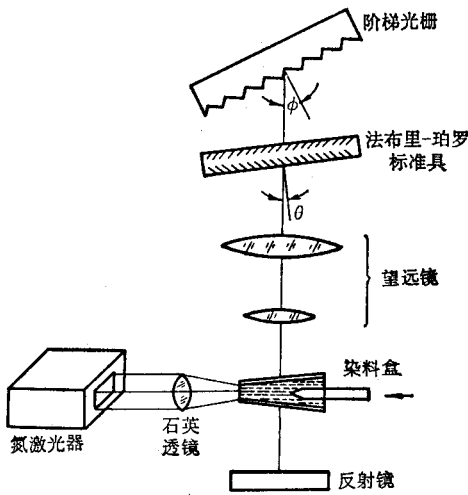


图 13 波长可调染料激光器装置的示意图

图 13 是一种波长可调染料激光器的装置示意图。用氮激光器作为光泵, 在谐振腔中同时用了转动光栅和法布里—珀罗标准具。倒置望远镜的作用一方面用来扩展激光束的直径, 避免烧毁光栅, 以保证染料激光器的大功率输出, 另一方面可以减小激光束的发散角, 有利于进一步压缩激光的带宽。

(3) 第三种类型的波长选择谐振腔中包含转动双折射晶体而产生色散的装置。由于双折射晶体中非常光线的折射率与入射方向有关, 因此可以利用转动双折射晶体时的色散现象将所需波长的激光分离出来。如图 14 所示, 一种简单的装置是包含沿晶体光轴方向切割的厚为  $\alpha$  的一块石英板, 当激光垂直入射至石英板时, 能使波前推后几个半波; 另外还有一组布儒斯特偏振板 ( $B_1$ 、 $B_2$ ), 在这种装置中, 当光程改变整倍半波时,

$$\Delta\mu\alpha_0 \cos\alpha = k \frac{\lambda}{2} \quad (27)$$

透射光强为极大, 其中  $k$  是级数,  $\Delta\mu$  是垂直入射时双折射晶体中非常光线与寻常光线折射率之差,  $\alpha_0$  是垂直入射时晶体的厚度。

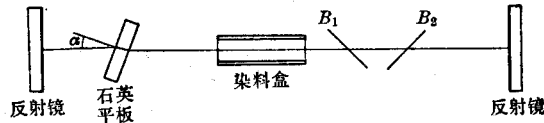


图 14 带有双折射滤光片的染料激光器

由 (27) 式得到束散角为  $\Delta\alpha$  时谱带宽度为

$$\Delta\lambda = -\tan\alpha\Delta\alpha = -\lambda \frac{\cos\alpha \sin\alpha}{\mu^2 - \sin^2\alpha} \quad (28)$$

当  $\alpha$  接近零时, 带宽很小, 有人采用适当取向的磷酸二氢钾 (KDP) 代替石英板, 可以用电压改变透射的波长, 得到的带宽小于 0.01 埃。电操纵的调光范围是 4 埃, 这种类型的装置的主要优点是便于电气操纵自动控制。

(4) 第四种类型的波长选择谐振腔中具有某种分布反馈, 有的是折射系数在空间周期性地变化, 有的是增益系数在空间周期性地变化。无论哪种形式的分布反馈都可以用来调谐波长, 并且和第二类型那种包含多光束干涉装置的一样, 使带宽大幅度地变窄。这种具有分布反馈的染料激光器的主要优点在集成光学中可以成为非常重要的有源元件。

第一个分布反馈染料激光器是由折射系数按  $\mu(z) = \mu + \mu_1 \cos kz$  的规律在空间周期性地变化所产生, 其中  $z$  是沿光轴方向测量的距离,  $k = 2\pi/\Lambda$ ,  $\Lambda$  是折射系数空间调制的周期,  $\mu_1$  是调制幅度。由于分布反馈的作用, 使原来较宽的谱带宽度 50 埃变为 0.5 埃, 使带宽大幅度地变窄。

另外,当染料溶液的增益具有周期空间变化时,也能够形成分布反馈放大。图15所示的装置,从倍频红宝石激光器分出的两束相干光会聚后用于泵浦若丹明6G溶液,染料激光器的波长 $\lambda_L = \mu_s \lambda_p / \sin \theta$ ,其中 $\mu_s$ 是染料溶液对激光波长 $\lambda_L$ 的折射系数, $\lambda_p$ 是泵浦波长。由此可见,通过改变角度 $\theta$ 或折射系数 $\mu_s$ ,都可以进行调谐。图16示出通过改变 $\theta$ 进行调谐的结果。而图17示出通过改变甲醇和苯甲基乙醇混合溶液的折射系数进行调谐的结果,在峰值泵浦功率约180千瓦,这种分布反馈染料激光器的平均输出功率为36千瓦,而带宽与泵浦功率较低时能小于0.01埃。

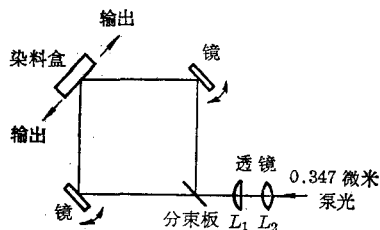


图15 分布反馈染料激光器实验装置

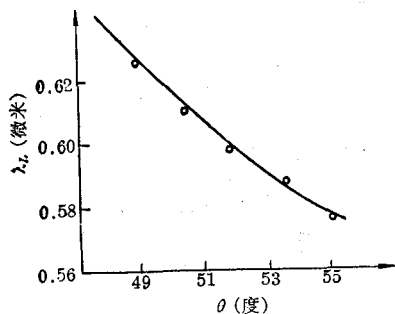


图16  $\lambda_L$ 与 $\theta$ 的关系

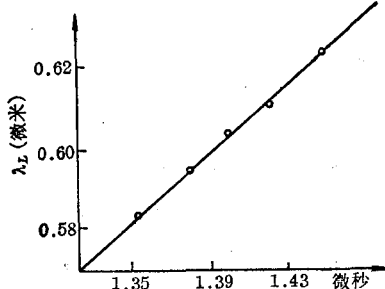


图17  $\lambda_L$ 与 $\mu_s$ 的关系

## 五、应用

近年来,激光的发展集中于大功率激光器、波长可调激光器、非线性光学以及扩展激光工作波段范围等方面。从染料激光器最近的一些发展看来,它在波长可调这方面比其他的激光器,诸如参量振荡器、电子自旋反转激光器等具有显著的优点;而且由于染料溶液的可以循环流动,能够使用于大功率情形而不致遭到损坏;由于荧光谱异乎寻常地宽,可以用来产生超短脉冲,从理论上估计可达约 $10^{-15}$ 秒。已经有人因锁模连续波染料激光器获得亚微微秒千瓦脉冲;由于染料激光器波长既可调又能获得大功率,因此用于研究非线性光学是最为方便的;气相染料激光器已经问世,为今后实现电泵浦染料激光器迈出了可喜的第一步。由此可见,染料激光器在今后的激光领域中将扮演极为重要的角色。

目前染料激光器的应用已经十分广泛,过去其他激光器所无法进行的一些工作,现在都可以用染料激光器来完成。

在光谱学方面,染料激光器可用于原子吸收光谱、荧光光谱或喇曼光谱,能提高光谱分析的灵敏度,并能在短时间内进行高精度测量,由于谱带窄,所以能够进行分辨率高达 $8 \times 10^{-10}$ 的光谱测量,能够得到过去必须依靠质谱分析才能得到的数据。

在测量大气污染方面,染料激光器利用光吸收、散射法可对大气中微量的污染物进行测量。由于波长可调,可以用微分吸收法测量大气中污染物的浓度,在一公里以内可测到0.1ppm(即百万分之0.2)的浓度。

在化学方面,染料激光器的运用,可以引起化学方面的革命。通过波长可调的染料激光器

可以将化学反应物激发到特定的激发态,或者将某些特定的化学键断裂,从而控制化学反应速度;也可将同位素激发到特定的激光态而将其分离,用波长可调染料激光器来进行同位素分离较质谱分析要方便得多。

在微观领域方面,锁模染料激光器产生的超短脉冲可用于研究物质的激发态及其弛豫过程,研究固体中离子间能量的传递,激发态电子顺磁共振,以及在极短时间内存在的物质性质的研究。这些应用都是染料激光器所特有的。

在物性研究方面,由于染料激光的波长既可调,功率又很大,因此用于研究光和物质的作用,特别是在非线性光学范围内更为有力。

染料激光器用于研究生物生长、遗传育种时,由于波长可调性,可以详尽地研究许多生化作用,生物物理作用,特别是可以通过调节辐照激光的波长,使生物产生更多的变异,使遗传育种工作加速进行。

染料激光器的波长可调性可用于彩色全息照相,获得彩色立体图象,还可用于确定染色材料的耐光性;用于疾病的诊断治疗;用于宇宙通讯技术中。

总之,染料激光器的应用将日趋广泛,并且其中大部分的应用不是用其他方法所能代替的。所以广大工农兵、工程技术人员和科学工作者正努力研究染料激光器,为加速我国的社会主义革命和社会主义建设作出新贡献。

### 参 考 资 料

- [1] 邱元武,染料激光器,《激光》,1975年4期。
- [2] F. P. Schäfer 主编,《Dye Laser》,1973年版。
- [3] 第八届国际量子电子学会议报告, *IEEEJ. Quant. Electr.*, **QE-10**(1974), No. 9.

上接第 22 页

② 将上下腔体纵向排列在机床工作台上,利用百分表将上下腔的左右定位止口找平,然后固定之,采用上下腔体同时加工(图 5)。

一切就绪后,刀具作旋转切削运动,工件作纵向送进运动,吃刀深度由升降工作台来调整。最后由测量腔体深度 34.64 来保证最终尺寸,亦即保证椭圆长轴中心线与上下定位止口面一致。

用铣削加工出来的椭圆柱形腔体光洁度一般可达  $\nabla 5 \sim \nabla 6$ ,然后再经抛光,光洁度可以达到  $\Delta 11 \sim \Delta 12$ 。

抛光时亦可采用此方法,将铣刀换成相应直径的毡轮,用研磨膏进行抛光。若没有立式铣床时,亦可采用卧式铣床加立铣头代替,可以得到同样的效果。根据解析几何公式,可以求出此椭圆的焦距  $2C$  为:

$$2C = 2\sqrt{L^2 - S^2} = 2\sqrt{\left(\frac{80}{2}\right)^2 - \left(\frac{69.28}{2}\right)^2} = 40。$$

通过我车间的实践,证明用立式铣床加工椭圆柱形聚光腔是一种既经济又行之有效的工艺方法。

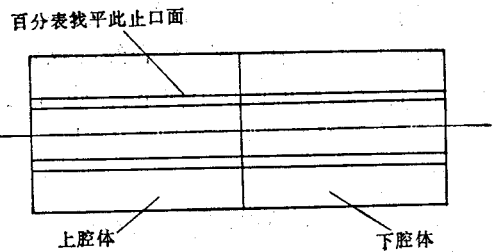


图 5